

引用格式:王学斌,郭晨霞,杨瑞峰,等. 光纤环非互易性结构仿真及设计优化[J]. 电光与控制, 2020, 27(4):78-81. WANG X B, GUO C X, YANG R F, et al. Simulation and design optimization of nonreciprocal structure of fiber coil[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):78-81.

光纤环非互易性结构仿真及设计优化

王学斌^{1,2}, 郭晨霞^{1,2}, 杨瑞峰^{1,2}, 葛双超^{1,2}

(1. 中北大学仪器与电子学院, 太原 030051; 2. 山西省自动化检测装备与系统工程技术研究中心, 太原 030051)

摘要: 主要针对光纤环在变化的温度场中产生的热致非互易性旋转速率误差(shupe 误差)进行了仿真分析, 并且提出了一种新的光纤环绕制方法以减小 shupe 误差。首先建立了3种对称绕法下带骨架光纤环的有限元模型并对它们施加相同的随时间变化的均匀温度场载荷, 经分析计算得到了光纤环中各匝的温度变化率数据。再利用精确到匝的光纤环热致旋转速率误差数学模型进行计算, 最后得出3种绕法下光纤环的 shupe 误差。仿真分析的结果表明采用新提出的反交叉对称绕法的光纤环对 shupe 误差的抑制效果最好。

关键词: 光纤环; shupe 误差; 有限元仿真; 反交叉对称绕法

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.015

Simulation and Design Optimization of Nonreciprocal Structure of Fiber Coil

WANG Xuebin^{1,2}, GUO Chenxia^{1,2}, YANG Ruifeng^{1,2}, GE Shuangchao^{1,2}

(1. Instrument and Electronics Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Automatic Testing Equipment and System Engineering Research Center of Shanxi Province, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The nonreciprocal thermal rotation rate error (shupe error) produced by the fiber coil in the changing temperature field is simulated and analyzed, and a new method for winding of the fiber coil is proposed to reduce the shupe error. Firstly, the finite element models of the fiber coil with skeletons are established respectively with three kinds of symmetrical winding methods, and the same uniform temperature field load varying with time is applied to the three models. After analysis and calculation, the temperature change rate of each turn in the fiber coil is obtained. Then, the shupe error of the fiber coil under the three winding methods is calculated respectively by using the mathematical model of the thermal rotation rate error of the fiber coil, which is accurate on the turn level. The simulation results show that the shupe error is best suppressed by using the new reverse-crossing symmetrical winding method.

Key words: optical fiber coil; shupe error; finite element simulation; reverse-crossing symmetric winding method

0 引言

光纤陀螺仪是一种利用 sagnac 效应来测量载体角速度及角加速度的新型惯性导航仪器, 与传统的机电式陀螺仪相比, 具有内部无运动部件、制造工艺简单、测量精度宽泛、启动速度快、动态范围大等优点^[1], 已被广泛应用于多个军用及民用领域^[2], 因此发展前景广阔的光纤陀螺吸引了许多国家广泛的关注与研究^[3]。

而作为光纤陀螺中核心部件的光纤环, 既是提高

测量精度的有效途径, 又是影响测量精度的主要因素。但是当光纤环周围工作环境的温度发生变化时, 光纤环中会产生入射光波的热致非互易性相位漂移, 从而导致光纤环的 shupe 误差, 这种温度漂移是光纤陀螺的主要误差之一^[4]。因此, 很多国家已经把光纤环温度性能的研究视为实现高精度光纤陀螺仪设计的必要途径^[5]。而光纤陀螺仪的温度性能主要是由光纤环的绕制方法决定的, 所以国内外的专家学者们提出了许多光纤环绕制方法来抑制热致非互易性相移的产生^[6-7]。其中, 四级对称绕法对于光纤环的 shupe 误差有着比较好的抑制作用, 已被广泛应用于光纤环的绕制工艺。然而该绕法下光纤环中残余的 shupe 误差对于高精度光纤陀螺的温度性能仍有很大的影响^[8]。对

收稿日期: 2019-05-30

修回日期: 2019-07-02

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201803D121058)

作者简介: 王学斌(1995—), 男, 山东莱阳人, 硕士生, 研究方向为光纤陀螺仪光纤环的优化设计。

于实现高精度光纤陀螺仪来说,光纤环的绕制方法仍有较大的研究空间。

为了进一步减小光纤环中产生的 shupe 误差,本文在前人对于光纤环绕法研究的基础上提出了新的光纤环绕制方法,即反交叉对称光纤环绕法。利用 ANSYS 软件建立了光纤环的有限元传热学模型,施加温度载荷后运算求解。再运用 Matlab 软件建立 shupe 误差的数学模型,得到 3 种绕法下光纤环的 shupe 误差,验证了新绕法对于抑制 shupe 误差的优越性。

1 3 种对称绕法的有限元模型及其光纤匝排布方式

基于 ANSYS 软件的 3 种精确到匝的对称绕法光纤环有限元模型截面如图 1 所示,为了保证光纤环线圈中各匝相对于整段光纤中点的对称性,整段光纤从中点开始绕制^[9]。图中,不同颜色的圆圈代表分居于整段光纤中点两侧的光纤匝截面,圆圈中的数字为各匝光纤的编号,编号的大小表示该匝光纤的起点与整段光纤起点之间的距离大小。光纤环的几何参数如下:光纤长度为 582.95 m,光纤由内侧向外侧环绕 32 层,每层有 112 匝光纤,总共有 3584 匝光纤,光纤截面直径为 0.245 mm。

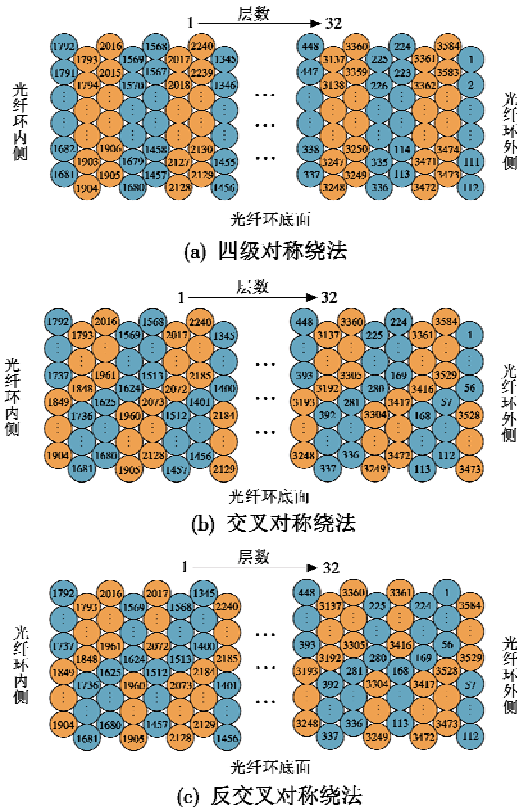


图 1 3 种对称绕法光纤环的有限元模型截面示意图

Fig.1 Section diagrams of finite element model of optical fiber coils by using three symmetrical winding methods

四级对称绕法已有许多文献详细描述过^[10],此处不再赘述。由图 1 可知,交叉对称绕法及反交叉对称绕法都是以 4 级对称绕法为基础的:交叉对称绕法以 4 层为一个绕制周期,1~4 层中上半部分光纤匝的排布方式与四级对称绕法相同,而下半部分光纤匝的排布方式与四级对称绕法相反,即位于光纤中点两侧的光纤匝的位置发生对调,从而构成了交叉对称绕法的一个绕制周期;反交叉对称绕法以 8 层为一个绕制周期,1~4 层中光纤匝的排布方式与交叉对称绕法相同,而 5~8 层中下半部分光纤匝的排布方式与四级对称绕法相同,而上半部分光纤匝的排布方式与四级对称绕法相反,从而构成了反交叉对称绕法光纤环的一个绕制周期。

2 基于 ANSYS 软件的光纤环有限元仿真

2.1 光纤环的 ANSYS 有限元模型

ANSYS 是一款致力于工程仿真的有限元分析软件,具有强大的多物理场耦合分析功能,对于热分析来说能够精确地计算出系统中存在的各种热载荷对整个模型温度场的影响,十分适用于光纤环的热效应仿真分析;并且可以根据具体的要求来修改传热学参数及位置参数,无需再次建模。这里采用 ANSYS 软件中的 Workbench 模块进行仿真分析,对不同绕法的带骨架光纤环进行建模仿真。因为钛合金材料的热力学参数与保偏光纤材料相近,所以被选作光纤环的骨架材料^[11]。由于绕制光纤环所选用的熊猫型保偏光纤是由光纤纤芯、包层、应力区及涂覆层组成的,且各组分之间的传热学性能相近,因此为了简化模型和仿真分析,需要根据保偏光纤中各组分材料参数进行综合计算:根据光纤中各组分的体积百分比计算光纤材料密度及导热系数的平均值,根据各组分的质量百分比计算光纤材料比热容的平均值。选用的光纤环材料和钛合金骨架材料的传热学参数如表 1 所示。根据带骨架光纤环的几何尺寸和材料参数建立起带骨架的光纤环模型,设置合适的网格尺寸保证每匝光纤的截面中至少包含一个网格单元,再对其进行网格划分得到光纤环的有限元传热模型。

表 1 光纤环材料及钛合金骨架的传热学参数

Table 1 Heat transfer parameters of optical fiber coil materials and titanium alloy framework

名称	参数		
	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
光纤环材料	1487.7	1195.3	0.49
钛合金骨架	4510	612	7.955

2.2 对光纤环模型加载温度场并仿真解算

由于温度实验中光纤环与周围的空气均匀地接

触,所以在 ANSYS 软件仿真中设定为光纤环模型的表面与周围的空气进行自然对流换热,换热系数为 5 W/(K·m)。对整个带骨架光纤环模型施加如图 2 所示的均匀温度场载荷。由于光波只在光纤的纤芯中传播,所以需要读取光纤纤芯处的温度变化情况。根据 3 种对称绕法下光纤匝的编号和与其对应的光纤纤芯位置坐标,在光纤环模型上插入温度探针,以读取加载温度载荷过程中各匝光纤纤芯处的温度变化情况。得到各绕法下光纤环的温度数据,再经数据处理便得到了各绕法下光纤环的温度变化率数据。以反交叉对称绕法为例,经过 ANSYS 软件仿真解算后得到的各匝光纤温度及温度变化率随时间的变化情况如图 3 所示。

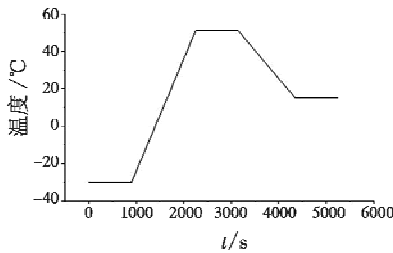


图 2 仿真实验温度场载荷曲线

Fig. 2 Temperature field load curve of simulation experiment

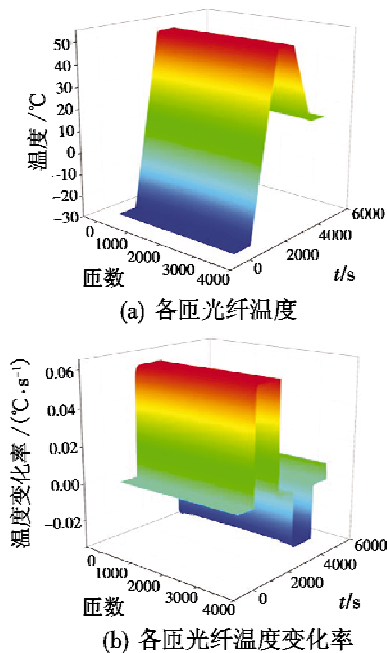


图 3 反交叉对称绕法中各匝光纤温度及温度变化率随时间变化情况

Fig. 3 Variation of temperature and its change rate of optical fibers with time in the reverse-crossing symmetric winding method

3 3 种对称绕法下光纤环的 shupe 误差

3.1 以匝为单位的离散化 shupe 误差数学模型

由于热传导作用,当光纤环周围的环境温度发生改变时,光纤环中将会产生轴向及径向的温度梯度,导

致整段光纤中不同点处的温度及温度变化率不同。而由于光纤的折射率会随着温度的变化而变化,并且相向传播的两束光波经过光纤中某一点(除了光纤中点)的时间不同,则在该点处由折射率引起的相位变化不同。因此两束光波经过光纤线圈后累积的相位变化便不同,从而形成了热致非互易性相移,由它引起的热致非互易性旋转速率误差^[12]为

$$\Omega_E(t) = \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \dot{T}(z,t)(L-2z) dz \quad (1)$$

式中: n 为光纤的折射率; D 为光纤环的有效直径(光纤环内外径的平均值); L 为光纤长度; $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为光纤的温度系数; $\dot{T}(z,t)$ 为光纤上 z 点在 t 时刻的温变速率; $(L-2z)$ 为与位置相关的位置因子。

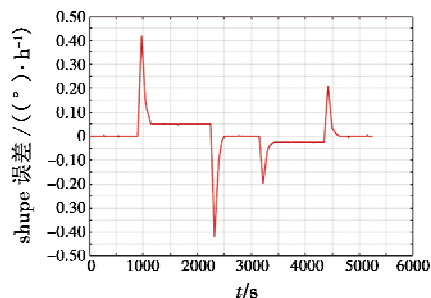
为了对仿真得到的各匝温度变化率数据进行处理来计算 shupe 误差,需要将式(1)离散化使其精确到匝。设光纤环有 J 层,每层由 K 匝光纤构成,则光纤环共有 JK 匝。设第 i 个光纤匝的起点距离整个光纤环起点(设为 S 端)的距离为 l_i ,第 i 个光纤匝的长度为 d_i ,则第 i 个光纤匝的结束点距离光纤环起点的距离为 $l_i + d_i$ 。再分别把第 i 个光纤匝的起点坐标代入式(1),便可得到精确到匝的 shupe 误差离散化表达式,即

$$\Omega_E(t) = \frac{n}{DL} \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{i=1}^{JK} \dot{T}(i,t)(L-2l_i-d_i)d_i \quad (2)$$

由式(2)可知,环境温度变化引起的旋转速率误差与第 i 匝光纤上的温度变化速率和该匝光纤的位置因子成正比,并且越靠近光纤线圈两端的光纤匝位置因子就越大。而各匝光纤的位置因子是由光纤环的绕法决定的,且在光纤中点两侧对称的光纤匝位置因子的正负对称性越好,则光纤环中产生的 shupe 误差越小。所以对光纤线圈的绕法进行优化改进可以有效降低光纤环中的 shupe 误差,提升光纤陀螺的测量精度。

3.2 3 种绕法对 shupe 误差的抑制作用

利用 Matlab 软件编写精确到匝的光纤环 shupe 误差数学模型程序,并通过该程序读取 ANSYS 仿真得到的 3 种对称绕法的各匝温度变化率数据,得到如图 4 所示的 3 种绕法光纤环的 shupe 误差图。



(a) 四级对称绕法

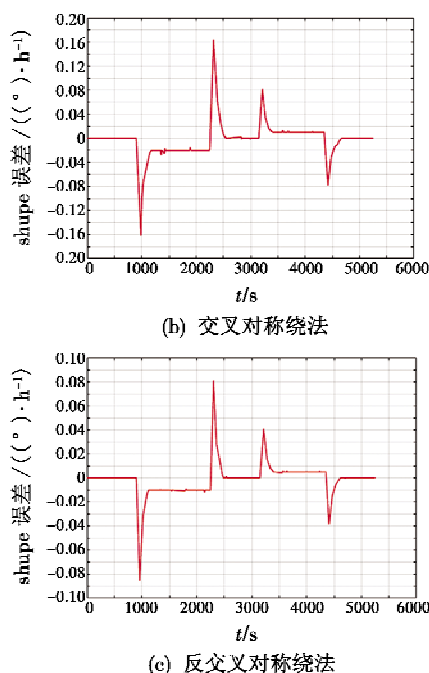


图4 3种绕法光纤环中的 shupe 误差

Fig. 4 Shupe errors in fiber coil by using the three winding methods

由图4可以看出,环境温度保持不变时,shupe 误差稳定为零,当环境温度发生突变时,由于光纤环中的温度变化率分布不均匀,光纤环中的 shupe 误差迅速增大到一个极值然后快速减小并维持在一个稳定值,稳定值体现了光纤环中各匝温度变化率相同时光纤环的绕法对于 shupe 误差的影响,且本文所采用的光纤环的极值约为稳定值的8倍。另外,同一种绕法下 shupe 误差的极值和稳定值与环境的温度变化速率成正比。不同的绕法对光纤环 shupe 误差的抑制效果不同,在相同的均匀温度场激励下,四级对称绕法产生的 shupe 误差最大,对 shupe 误差的抑制作用最小。交叉对称绕法产生的 shupe 误差约为四级对称绕法的40%,对 shupe 误差的抑制作用有了很大提升。而反交叉对称绕法产生的 shupe 误差则约为四级对称绕法的20%,在交叉对称绕法的基础上进一步提升了对于 shupe 误差的抑制能力。

4 结论

本文主要针对反交叉对称绕法下的光纤环进行仿真分析来验证其对光纤环热致 shupe 误差的抑制效果。首先通过 ANSYS 软件建立了带骨架光纤环的有限元传热模型,给模型施加变化的温度载荷,得到3种绕法下各匝光纤纤芯处的温度变化率。再通过 Matlab 软件编写离散化的 shupe 误差数学模型程序,并读取光纤匝的温度变化率数据,得到3种绕法下的光纤环

产生的 shupe 误差,最后通过对比得出光纤环的反交叉对称绕法对 shupe 误差的抑制效果最好,所以值得对这种新型的光纤环绕制方法及绕制工艺做进一步的研究。另外,由分析结果可知 shupe 误差在环境温度发生变化时产生,且在同一种绕法下 shupe 误差的极值和稳定值与环境的温度变化速率成正比,这对于光纤环外部环境的温度控制具有重要的指导意义。由离散化的 shupe 误差公式可知,在光纤中点两侧对称的光纤匝位置因子的正负对称性越好,则光纤环中产生的 shupe 误差越小,这也为光纤环绕法的改进优化提供了理论依据。

参考文献

- [1] 张春梅. 光纤陀螺温度特性分析与补偿[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [2] 张晓峰, 范华春, 梁宇. 基于温度梯度的光纤陀螺输出漂移补偿[J]. 压电与声光, 2011, 33(1): 38-40.
- [3] DIVAKARUNI S, KEITH G, NARAYANAN C, et al. Strategic interferometric fiber-optic gyroscope for ballistic missile inertial guidance [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008:1-8.
- [4] 王超, 吴刚, 凌青, 等. 光纤陀螺温度漂移建模与预测[J]. 电光与控制, 2015, 22(12): 40-44.
- [5] 于中权, 张珉, 陈习元, 等. 光纤环温度性能仿真分析[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 421-426.
- [6] 王玥泽, 陈晓冬, 张桂才, 等. 八极绕法对光纤陀螺温度性能的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5): 617-620.
- [7] GAO Z X, ZHANG Y G, WANG G C, et al. Analysis and simulation for the thermal performance of the octupolar fiber coil[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 016114-1-016114-5.
- [8] 李绪友, 张春梅, 刘华兵, 等. 光纤环十六极对称绕法温度性能的仿真与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(6): 780-785.
- [9] 王玥泽. 光纤陀螺温度误差及其抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] 乔立军. 光纤环绕制工艺优化设计[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [11] 杨纪刚, 毕聪志, 孙国飞. 光纤传感环骨架热应力仿真计算与实验研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(3): 65-73.
- [12] 宋凝芳, 关月明, 贾明. 光纤陀螺光纤环 Shupe 误差的多参数影响仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(5): 569-573.